

Étude de l'asservissement de la chaîne de transmission de puissance permettant l'ouverture des volets de la nacelle

La chaîne de transmission de puissance entre le moteur et l'ouverture des volets peut être modélisée comme suit :

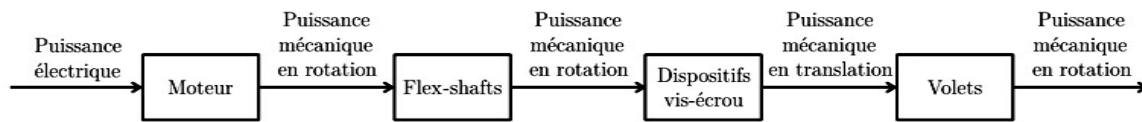


Figure 1 - Chaîne de puissance entre le moteur et l'ouverture des volets.

Étude du moteur à courant continu

Objectif : Mettre en place le modèle du moteur à courant continu et son asservissement en couple.

Le moteur entraînant la rotation des flex-shafts est un moteur à courant continu. Il peut être modélisé par les équations suivantes :

- Équation électrique : $u(t) = e(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$
- Équations de couplage : $C_m(t) = K_m \cdot i(t)$; $e(t) = K_m \cdot \omega_m(t)$.

L'arbre du moteur est soumis au couple résistant $C_r(t)$ et fournit le couple moteur $C_m(t)$. En notant J_m le moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre moteur, le principe fondamental de la dynamique conduit à l'équation suivante :

- Équation mécanique : $J_m \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$

On considère le schéma bloc du moteur décrit Figure 2.

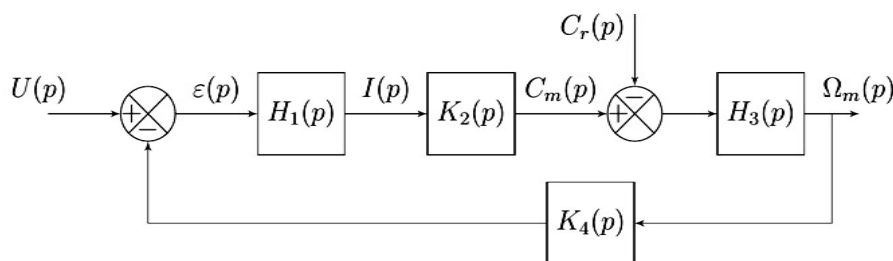


Figure 2- Schéma bloc du moteur seul.

Q1. Établir les expressions littérales des quatre fonctions de transfert du schéma bloc de la Figure 2 dans les conditions de Heaviside.

Afin de bien contrôler l'effort en sortie du moteur, un asservissement en couple du moteur est nécessaire. Or, le couple $C_m(t)$ est proportionnel à l'intensité $i(t)$ qui circule dans l'induit. Faire un asservissement en couple consiste donc à asservir en intensité le moteur. Le schéma bloc suivant (Figure 3) représente l'asservissement en intensité du moteur avec :

- une résistance servant de capteur de courant de gain pur R_e ,
- un correcteur de fonction de transfert $C(p)$,
- un adaptateur de gain pur K_a .

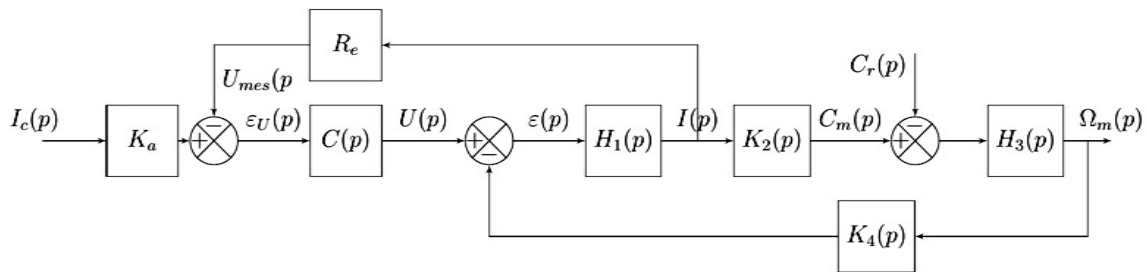


Figure 3 - Schéma bloc du moteur à courant continu asservi en intensité.

Q2. Déterminer la valeur de K_a afin qu'en régime établi $i(t) = i_c(t)$.

Q3. En bloquant la rotation du moteur et en l'absence de couple résistant ($C_r(t) = 0$), calculer la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement en courant $\frac{U_{mes}(p)}{\varepsilon_U(p)}$.

Le choix a été fait de prendre un correcteur de type proportionnel intégral (PI) :

$$C(p) = K_p \cdot \frac{1 + \tau_i \cdot p}{\tau_i \cdot p}$$

avec $K_p > 1$. Le correcteur PI est réglé de façon à réaliser une compensation du pôle électrique.

Q4. En déduire la valeur de τ_i

Q5. Montrer alors que la fonction de transfert $\frac{I(p)}{I_c(p)}$ peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{I(p)}{I_c(p)} = \frac{R_e \cdot K_p}{R_e \cdot K_p + \tau_i \cdot R \cdot p}$$

Q6. En déduire l'expression du temps de réponse de la boucle de courant et la valeur de K_p permettant de répondre au cahier des charges ($L = 1 \cdot 10^{-5} \text{H}$ et $R_e = 0,01 \Omega$).

Le graphe suivant (Figure 4) présente la réponse indicielle expérimentale de l'effet du correcteur sur la réponse de la boucle d'asservissement.

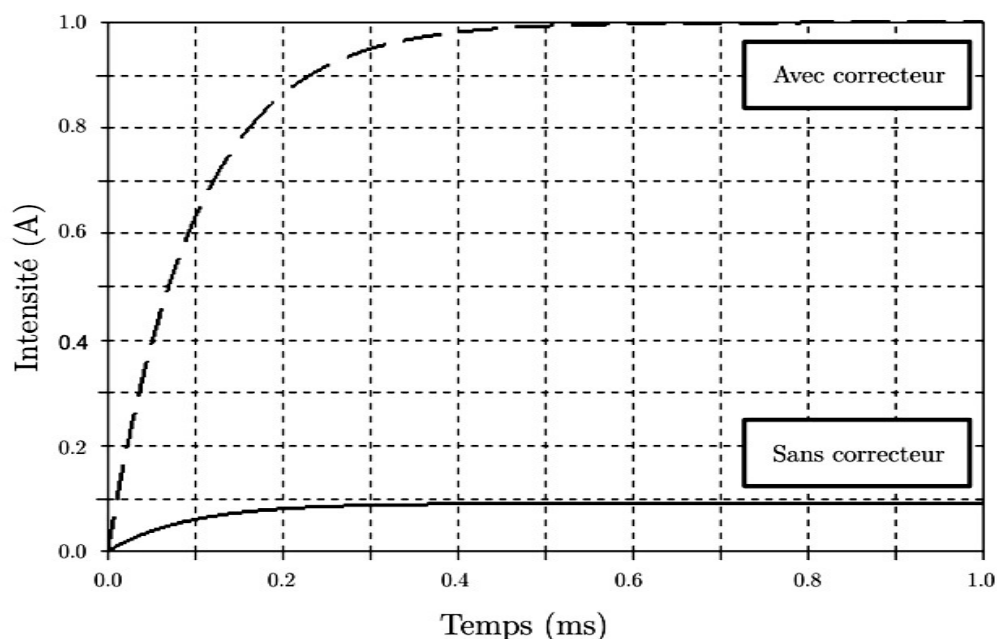


Figure 4 - Effet du correcteur sur l'asservissement en intensité du moteur à courant continu.

Q7. A partir du graphique, valider le modèle théorique précédemment établi et vérifier les performances attendues dans le diagramme des exigences.

Étude des flex-shafts

Objectif : Caractériser le comportement des flex-shafts.

Les flex-shafts sont des dispositifs de transmission de mouvement de rotation semi-rigides. Grâce à leur structure (câble + gaine) il est possible de transmettre un mouvement de rotation depuis la sortie du moteur (d'angle de rotation θ_m) jusqu'aux dispositifs vis-écrou d'angle de rotation θ_f en adoptant une géométrie quasi-circulaire.

Les flex-shafts (Annexe 1) n'étant pas des structures indéformables, un modèle de connaissance est nécessaire afin de prendre en compte les déformations éventuelles en rotation dans le modèle complet de l'inverseur de poussée.

La vis (d'inertie équivalente J_r) du système vis-écrous est soumise au couple C_r composé d'un couple C_{ff} issu d'un frottement fluide entre les différentes parties du flexible et d'un couple C_e issu du comportement élastique du flexible en rotation.

Il vient alors :

$$-C_r(t) = C_{ff}(t) + C_e(t);$$

$$-C_{ff}(t) = f \cdot (\omega_m(t) - \omega_f(t));$$

$$-C_e(t) = k(\theta_m(t) - \theta_f(t)).$$

avec :

$$-\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt};$$

$$-\omega_f(t) = \frac{d\theta_f(t)}{dt}$$

Ainsi, le schéma-bloc associé au flex-shaft est donné Figure 5.

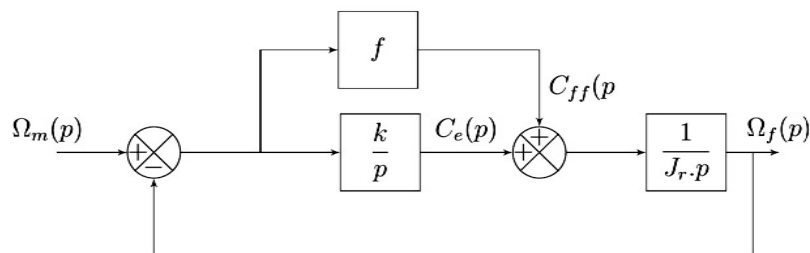


Figure 5 - Schéma-bloc associé au flex-shaft.

Q8. Calculer la fonction de transfert $\frac{\Omega_f(p)}{\Omega_m(p)}$ en fonction des paramètres présentés précédemment.

Q9. Calculer la limite quand t tend vers l'infini de $\omega_m(t) - \omega_f(t)$ pour une entrée en rampe de $\omega_m(t)$ de pente a_{m0} .

Q10. Caractériser le comportement du flex-shaft à temps infini pour l'entrée définie précédemment.

Mise en place de l'asservissement en position de l'arbre moteur

Objectif : Mettre en place l'asservissement du moteur en position en réalisant le réglage du correcteur à avance de phase.

Les modèles précédents étant définis, il est possible de réaliser une deuxième boucle d'asservissement contrôlant la position de l'arbre moteur. Un seul moteur contrôlant la rotation de 4 vis, il n'est pas possible d'asservir indépendamment chacune des vis. L'action correctrice ne peut être effectuée qu'au niveau de l'axe moteur. Un codeur incrémental (capteur de position), un adaptateur et un correcteur ont été ajoutés.

La modélisation Figure 6 est proposée :

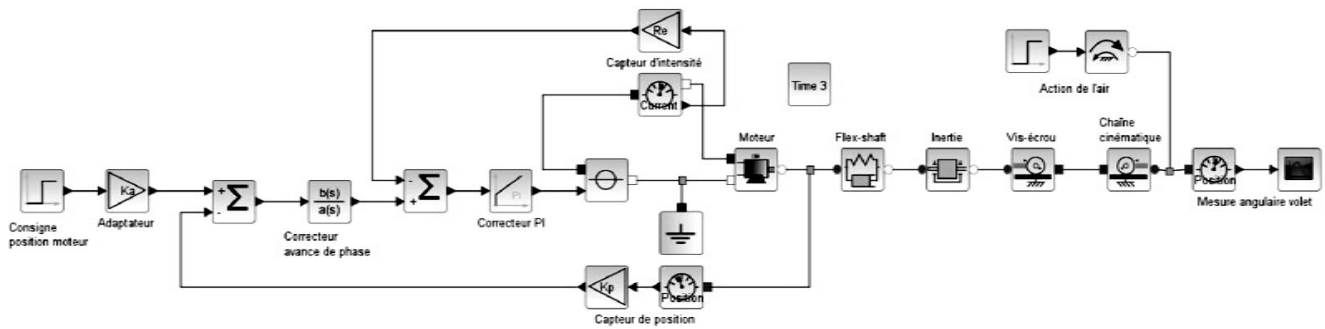


Figure 6 - Modèle acausal de l'eTras[®] avec sa boucle d'asservissement en position.

Le diagramme de Bode approché de la fonction de transfert en boucle ouverte de cet asservissement sans correction est donné ci-dessous (Figure 7).

Le cahier des charges impose une pulsation de coupure à 0 dB de ω_{BP} et une marge de phase minimum de 45° . Pour y parvenir, le correcteur choisi est un correcteur à avance de phase : $C_2(p) = \frac{C_2 \cdot (1 + a \cdot \tau \cdot p)}{1 + \tau \cdot p}$ avec $a > 1$.

Pour ce type de correcteur pour $\omega = \omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{a} \cdot \tau}$ la phase ϕ est maximale et est telle que $\sin(\phi) = \frac{a-1}{a+1}$.

Q11. Tracer le diagramme de Bode asymptotique et l'allure réelle du correcteur, préciser les valeurs caractéristiques.

Q12. Déterminer $\phi_{\max}$ permettant de respecter le cahier des charges.

Q13. En déduire les expressions analytiques de a et τ . Calculer numériquement a et poser le calcul de C_2 avec les valeurs numériques nécessaires.

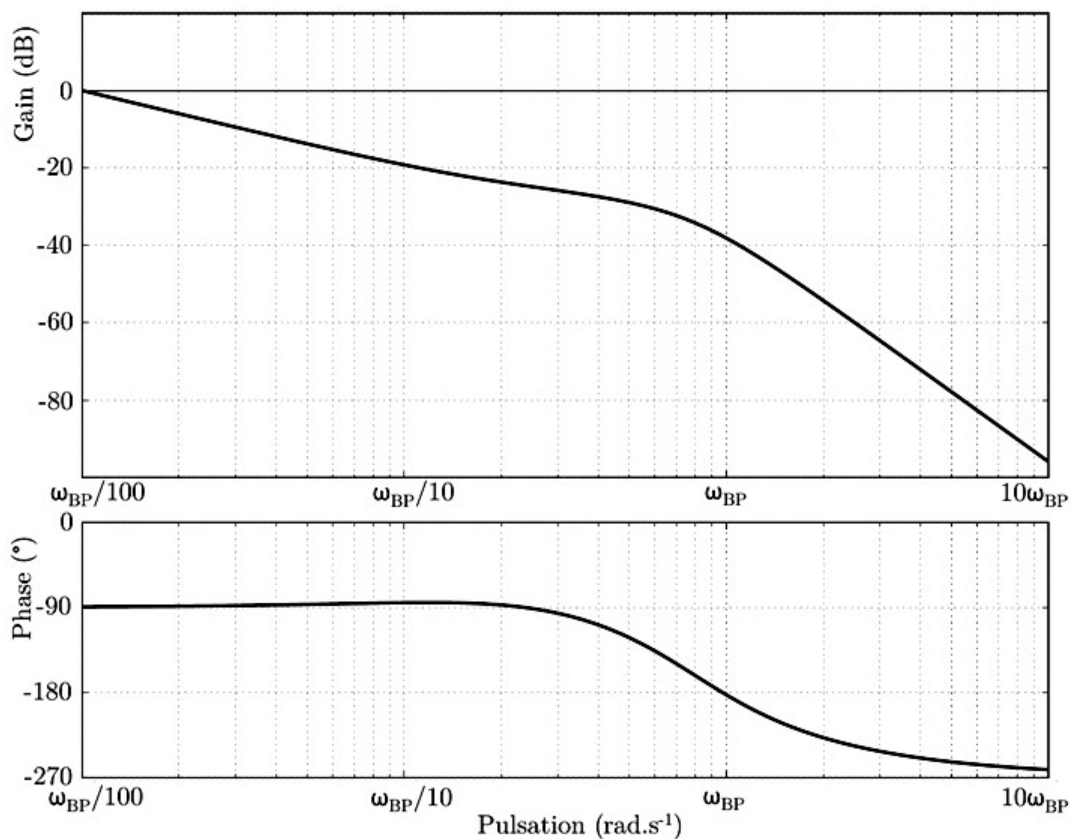
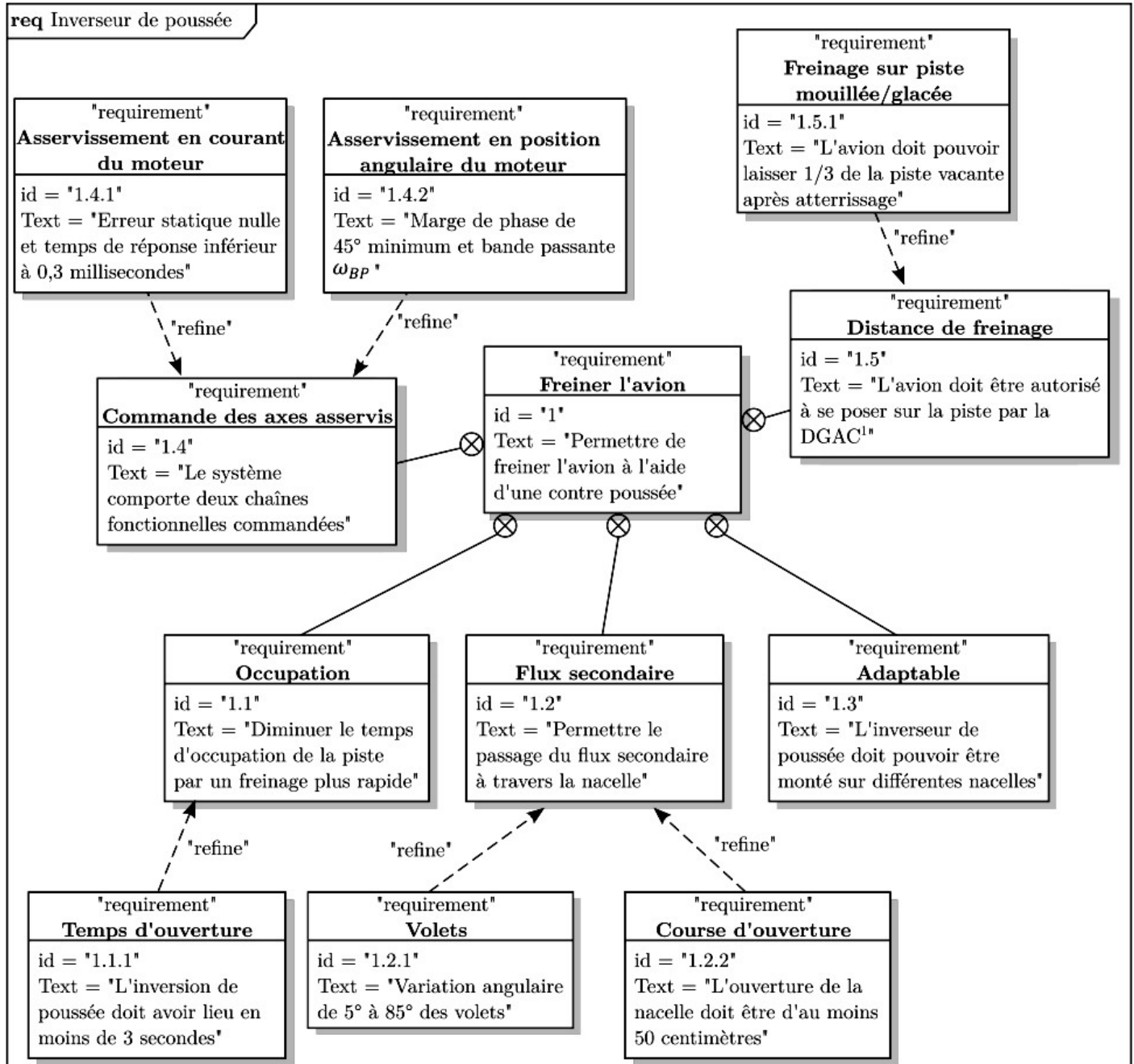


Figure 7 - Diagramme de Bode de l'asservissement en position sans correcteur.



Annexe 1 - Décomposition des éléments du système eTras[®]

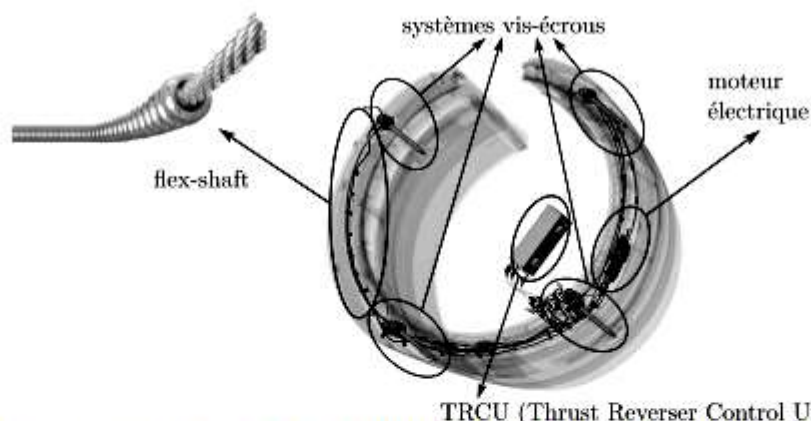


FIGURE 8 – Principaux constituants de la chaîne de puissance du eTras[®].

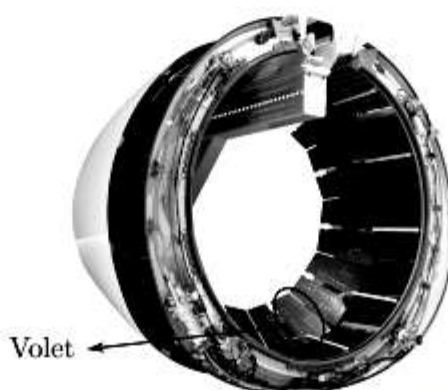


FIGURE 9 – Vue des volets dans la nacelle.

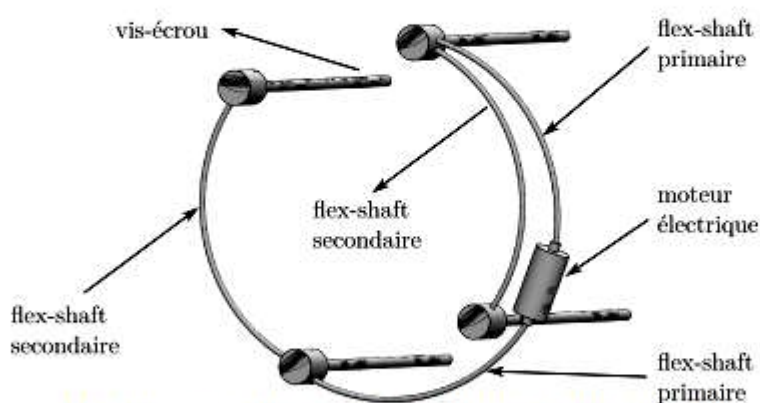


FIGURE10 – Illustration de l'architecture des flex-shafts.

Comme le montre la Figure10, le moteur électrique est raccordé aux flex-shafts primaires qui à leur tour sont raccordés en série via des renvois d'angle situés au niveau des premiers systèmes vis-écrou aux flex-shafts secondaires. Chaque système vis-écrou est mis en mouvement par l'intermédiaire d'un ou deux flex-shafts et d'un renvoi d'angle.